

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

Herausgeber:	Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
Redaktion:	Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten Andrea Schneider Fakultät für Maschinenbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges, Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer, Dipl.-Ing. Silke Stauche
Redaktionsschluss: (CD-Rom-Ausgabe)	31. August 2005
Technische Realisierung: (CD-Rom-Ausgabe)	Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau Dipl.-Ing. Christian Weigel Dipl.-Ing. Helge Drumm Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Technische Realisierung: (Online-Ausgabe)	Universitätsbibliothek Ilmenau ilmedia Postfach 10 05 65 98684 Ilmenau
Verlag:	 Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V. Werner-von-Siemens-Str. 16 98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe):	3-932633-98-9	(978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe):	3-932633-99-7	(978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

C. Schenk, S. Risse

Analytisches Modell ebener aerostatischer Gaslager Elemente für Präzisionsführungen im Hochvakuum

ABSTRACT

Für die Anwendung ebener aerostatischer Düsenlager Elemente mit Mikroverteilerstrukturen in einer Hochvakuumumgebung wird ein analytisches Modell zur Dimensionierung vorgestellt, dass die veränderten Abströmverhältnisse im Vakuum berücksichtigt. Die Ergebnisse der an einem statischen Versuchsaufbau zur Verifizierung des Modells durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden präsentiert. Durch vergleichende Experimente an Lager Elementen mit verschiedenen Düsendurchmessern wird ein signifikanter Einfluss des Drosselquerschnittes auf die Lagereigenschaften und die Vakuumtauglichkeit der Lager Elemente nachgewiesen.

EINLEITUNG

Zur Dimensionierung ebener aerostatischer Lager Elemente mit Mikrodüsen sind aus mehreren Arbeiten [1-5] Auslegungsgleichungen bekannt. Die Modelle wurden für den Einsatz der Lager Elemente an Normalatmosphäre aufgestellt. Der Gültigkeitsbereich beschränkt sich auf eine im Lager ausgeprägte Kontinuumsströmung. Die sich im Lagerspalt ausbildende Strömungsart wird durch das Verhältnis der mittleren freien Weglänge der Gasteilchen zum Strömungsquerschnitt bestimmt. In den Randzonen der Lager Elemente erreicht die mittlere freie Weglänge Werte, die der Dimension des Lagerspaltes entsprechen bzw. diese unterschreiten können. Untersuchungen von Donat [2] haben gezeigt, dass der damit verbundene Übergang der Kontinuumsströmung zur Knudsenströmung beim Einsatz der Lager Elemente an Normalatmosphäre für technisch relevante Lagerspalte vernachlässigt werden kann.

Bei der Anwendung von Gaslager Elementen im Hochvakuum werden zur Minimierung des Leckstromes in die Vakuumumgebung Lager Elemente mit einer unmittelbar an den Lagerbereich angrenzenden Absaugkaskade eingesetzt. Das Arbeitsgas entspannt sich im Lagerspalt in Richtung des Lagerrandes auf Druckwerte im Grobvakuumbereich. Es findet ein Übergang von der Kontinuumsströmung über die Knudsenströmung zur Molekularströmung statt.

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, kann die Knudsenströmung in Abhängigkeit von Speisedruck und Lagerspalt die bestimmende Strömungsform über den Abströmbereich sein und ist bei der analytischen Beschreibung der Lagereigenschaften zu berücksichtigen. Die Molekularströmung tritt für technisch relevante Lagerspalte und Speisedrücke nur in einem sehr schmalen Bereich nahe des Lagerrandes auf. Der in diesem Bereich vorherrschende sehr niedrige Druck liefert keinen signifikanten Beitrag zur Tragkraft des Lagerelementes. Daher kann für die Dimensionierung der Lagerelemente im Hochvakuum die Molekularströmung analog zur Knudsenströmung an Normalatmosphäre vernachlässigt werden.

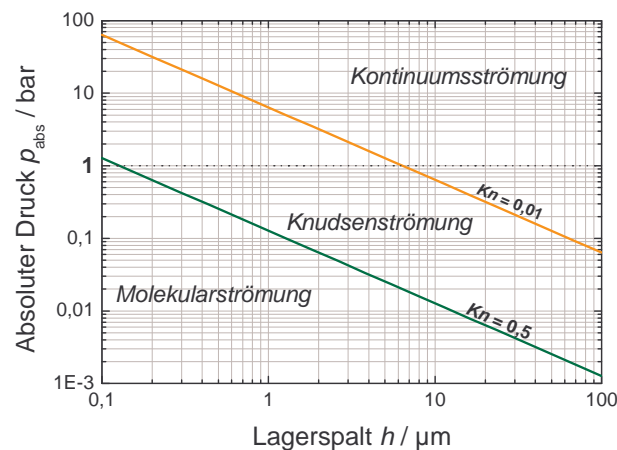


Abbildung 1: Strömungsarten in Abhängigkeit von Lagerspalt und Druck im Lagerspalt am Beispiel des Arbeitsgases Stickstoff.

Zur Dimensionierung ebener kreisförmiger Lagerelemente mit Einströmdrosseln und Mikroverteilerstrukturen (siehe Abbildung 2) wird für den Einsatz in einer Vakuumumgebung ein analytisches Modell unter Berücksichtigung der Knudsenströmung abgeleitet und diskutiert. Die Lagerelemente sind durch sehr gute mechanische Lagereigenschaften in Verbindung mit einem geringen Gasverbrauch gekennzeichnet. Durch die Integration von Absaug- und Dichtstrukturen in die Lagerelemente ist der direkte Einsatz der Elemente in einer Hochvakuumumgebung möglich.

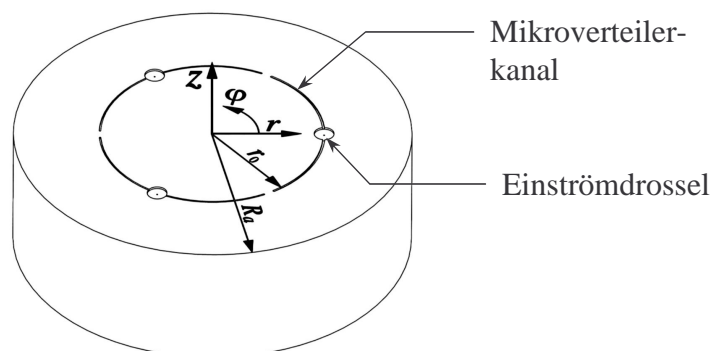


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Lagerfläche eines Lagerelementes.

ANALYTISCHES MODELL

Die für den Einsatz im Hochvakuum konzipierten Gaslagerelemente weisen unmittelbar an den Lagerbereich angrenzende Absaugstrukturen auf, die das in die Lagerelemente einströmende Gas nahezu vollständig abführen und damit den verbleibenden Leckstrom in die Vakuumumgebung minimieren. Der Umgebungsdruck p_a des Lagerbereiches ist unter der Voraussetzung, dass sich das Gas in Richtung des Lagerrandes auf Druckwerte im Grobvakuumbereich entspannt, stets wesentlich kleiner als der mittlere Druck \bar{p} im Lagerspalt ($p_a \ll \bar{p}$). Folglich scheint für die Entwicklung des Modells die vereinfachende Annahme $p_a = 0$ zulässig.

Die Grundlage zur Berechnung der Strömungsvorgänge in den aerostatischen Lagerelementen bilden die Navier-Stokes-Gleichungen, die Kontinuitätsbedingung sowie die Zustandsgleichung des idealen Gases.

Die Strömungsverhältnisse im Abströmspalt lassen sich durch eine divergierende ebene Radialströmung beschreiben. Aus der Navier-Stokes-Gleichung folgt durch vereinfachende Annahmen nach [1] die Differentialgleichung der ebenen Poiseuille-Strömung

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \eta \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Dabei sind η die dynamische Viskosität, p der absolute Druck, r der Radius, v_r die Strömungsgeschwindigkeit in radialer Richtung und z die Koordinate des Lagerspaltes. Für das Gebiet der Knudsenströmung trifft die in den bekannten Modellen angenommene Randbedingung des an den Wänden haftenden Strömungsmediums nicht mehr zu ($v_r(\pm h/2) = 0$). In Wandnähe stellt sich ein steiler Geschwindigkeitsgradient ein, der durch die Randbedingungen

$$v_r\left(z = -\frac{h}{2}\right) = \bar{l} \frac{\partial v_r}{\partial z} \quad \text{und} \quad v_r\left(z = +\frac{h}{2}\right) = -\bar{l} \frac{\partial v_r}{\partial z} \quad (2)$$

berücksichtigt wird. Hierin sind h der Lagerspalt und \bar{l} die mittlere freie Weglänge. Mit der gasspezifischen Konstante c ist die mittlere freie Weglänge nach [2] gegeben durch

$$\bar{l} = \frac{c}{p}; \quad c = \frac{m_{\text{Mo}} \cdot R_G \cdot T}{\sqrt{2} \pi \cdot d_{\text{Mo}}^2}. \quad (3)$$

Dabei ist m_{Mo} die Masse der Gasteilchen, d_{Mo} der gaskinetische Wirkungskindmesser der Gasteilchen, R_G die Gaskonstante und T die absolute Temperatur. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Abströmspalt ergibt sich aus (1) und (2) zu

$$\bar{v}_r = -\frac{1}{2\eta} \left(\frac{h^2}{6} + \frac{c}{p} \cdot h \right) \frac{dp}{dr}. \quad (4)$$

Der Beitrag des druckabhängigen Terms in (4) zur Berücksichtigung der Knudsenströmung steigt für einen geringen Druck bzw. geringe Lagerspalte und führt zu einer im Vergleich zur Kontinuumsströmung höheren Strömungsgeschwindigkeit. Der Massestrom \dot{m} durch den Spaltquerschnitt $A(r)$ ist gemäß der Kontinuitätsbedingung für alle Orte r konstant und nach [7] mit der Dichte ρ bestimmt zu

$$\dot{m}_{\text{Spalt}} = \rho \cdot A \cdot \bar{v}_r = 2\pi \cdot \rho \cdot \bar{v}_r \cdot r \cdot h. \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung der Zustandsgleichung idealer Gase folgt mit (4) aus (5) für den Massestrom nach Integration

$$\dot{m}_{\text{Spalt}} = \frac{\pi \cdot h^2}{\eta \cdot R_G \cdot T \cdot \ln\left(\frac{R_a}{r_0}\right)} \left\{ c \cdot p_k + \frac{h}{12} p_k^2 \right\} \quad (6)$$

Dabei sind p_k der Kammerdruck in dem von den Mikroverteilerkanälen eingeschlossenen Bereich, r_0 der Radius der Mikroverteilerkanäle und R_a der Radius des Lagerrandes.

Zur Beschreibung der Strömung in den Einströmdrosseln kann aus der Navier-Stokes-Gleichung die Bernoullische Gleichung abgeleitet werden [1], deren Lösung die Strömungsgeschwindigkeit nach St. Venant-Wantzel liefert. Die Berücksichtigung der Kontinuitätsbedingung führt zur Ausflussgleichung der Einströmdrossel

$$\dot{m}_{\text{Drossel}} = \alpha \cdot A_D \frac{p_s}{\sqrt{R_G \cdot T}} \cdot \Phi \quad (7)$$

mit

$$\Phi = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_k}{p_s} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_k}{p_s} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad \forall \quad \frac{p_k}{p_s} \geq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$\Phi = \Phi_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}} \quad \forall \quad \frac{p_k}{p_s} < \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

Hierbei sind α die Ausflusszahl zur Berücksichtigung von Reibungsverlusten und der Strahlkontraktion, A_D der engste Düsenquerschnitt, p_s der Speisedruck und κ der Adiabatenkoeffizient.

Zur Berechnung der Tragfähigkeit F eines Lagerelementes müssen die Druckdifferenzen zum Umgebungsdruck über die Lagerfläche integriert werden. Unter der Annahme, dass das Gas von den Mikroverteilerkanälen nur in Richtung des Lagerrandes abströmt, liegt in dem von den Kanälen eingeschlossenen Bereich A_M ein konstanter Druck vor, der dem Kammerdruck entspricht. Der mittlere Druck unter der Abströmfläche A_R ergibt sich aus (5) und (6) zu

$$\bar{p} = \frac{e^{\frac{2}{G}} \sqrt{\frac{\pi \cdot G}{8}} \frac{6c + h \cdot p_k}{h} \left(\operatorname{Erf} \sqrt{\frac{2}{G}} - \operatorname{Erf} \sqrt{\frac{2}{G} - 2 \cdot \ln \left(\frac{R_a}{r_0} \right)} \right) - p_k}{\left(\frac{R_a}{r_0} \right)^2 - 1} \quad (8)$$

mit

$$G = \frac{p_k^2 + \frac{12c}{h} p_k}{\ln \left(\frac{R_a}{r_0} \right) \left(\frac{6c + h \cdot p_k}{h} \right)^2}$$

Zur Berechnung der Tragkraft wird in Analogie zu [2] eine effektive Fläche A_{eff} eingeführt, über der der Druck p_k wirksam wird.

$$F = p_k (A_M + k \cdot A_R) = p_k \cdot A_{\text{eff}} \quad (9)$$

Für kreisförmige Lagerelemente ist die effektive Fläche in (9) definiert nach

$$A_{\text{eff}} = \pi \left[r_0^2 + k (R_a^2 - r_0^2) \right] \quad (10)$$

mit dem aus (8) abgeleiteten Flächenbeiwert k

$$k = \frac{e^{\frac{2}{G}} \sqrt{\frac{\pi \cdot G}{8}} \frac{6c + h \cdot p_k}{h} \left(\operatorname{Erf} \sqrt{\frac{2}{G}} - \operatorname{Erf} \sqrt{\frac{2}{G} - 2 \cdot \ln \left(\frac{R_a}{r_0} \right)} \right) - p_k}{p_k \left(\left(\frac{R_a}{r_0} \right)^2 - 1 \right)}. \quad (11)$$

Wird bei der Herleitung der Strömungsgeschwindigkeit im Abströmspalt von der für die Kontinuumsströmung gültigen Randbedingung des an den Wänden haftenden Strömungsmediums $v_r(z = \pm h/2) = 0$ ausgegangen, entfallen alle von der mittleren freien Weglänge abhängigen Terme in (11) ($c = 0$). Der Flächenbeiwert k vereinfacht sich im Gegensatz zu dem in [2] für die Anwendung an Normalatmosphäre definierten Flächenbeiwert zu einem konstanten Ausdruck, der einzig von den Radien R_a und r_0 des Lagerelementes und nicht mehr vom Lagerspalt abhängt.

$$k = \frac{\sqrt{2\pi} R_a^2 \operatorname{Erf} \sqrt{2 \ln \left(\frac{R_a}{r_0} \right)} \sqrt{\frac{1}{\ln \left(\frac{R_a}{r_0} \right)} - 4 r_0^2}}{4 (R_a^2 - r_0^2)} = \text{const.} \quad (12)$$

Die Steifigkeit s der Lagerelemente wird durch Differentiation der Tragkraftkurven bestimmt.

$$s = - \frac{dF}{dh} \quad (13)$$

Der Gasverbrauch eines Lagerelementes Q_{Pad} in Abhängigkeit des Lagerspaltes ergibt sich nach der Kontinuitätsbedingung bezogen auf Normbedingungen mit (6) bzw. (7) und der Anzahl n der Einströmdrosseln zu

$$Q_{\text{Pad}} = \dot{m}_{\text{Spalt}} \cdot N = n \cdot \dot{m}_{\text{Drossel}} \cdot N \quad \text{mit} \quad N = \frac{273 \text{ K} \cdot R_G}{101300 \text{ Pa}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 1000 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} \quad (14)$$

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Die experimentellen Untersuchungen wurden an Lagerelementen mit drei Mikrodüsen in einer Versuchskammer im Hochvakuumbereich bis 10^{-7} mbar durchgeführt. Der Lagerbereich der in Abbildung 3 dargestellten Elemente ist von einem konzentrischen Absaugkanal umgeben, der über eine separate Drehschieberpumpe evakuiert wird. An den Absaugkanal schließt sich ein Dichtbereich an, der in Verbindung mit dem Gegenpart eine Spaltdichtung zur Reduzierung des Leckstromes in die Vakuumumgebung bildet.

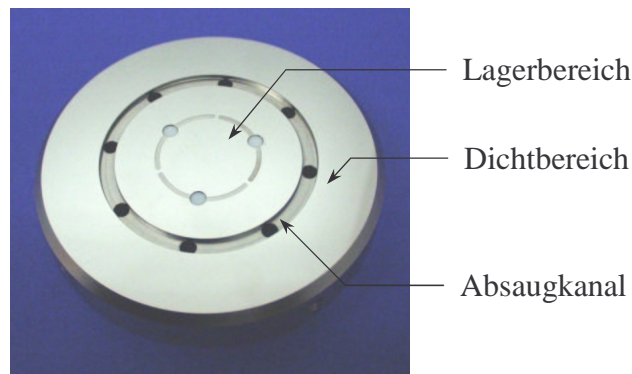


Abbildung 3: Hochvakuumtaugliches ebenes aerostatisches Lagerelement.

Zur Verifizierung des Modells wurden unter Hochvakuumbedingungen für verschiedene Düsendurchmesser, Arbeitsgase und Speisedrücke experimentell die Tragkräfte in Abhängigkeit vom Lagerspalt aufgenommen und mit den theoretisch berechneten Werten verglichen. Aus der Gegenüberstellung der bestimmten Tragkräfte in Abbildung 4 wird eine sehr gute Übereinstimmung der analytisch bestimmten und experimentell gewonnenen Daten ersichtlich. Der Korrelationskoeffizient beträgt $R = 0,996$.

In [6] wurden Untersuchungen von Lagerelementen mit einem Düsendurchmesser von $100 \mu\text{m}$ an Normalatmosphäre und im Hochvakuum durchgeführt. Signifikante Unterschiede der Lageigenschaften zwischen den beiden Einsatzfällen wurden nachgewiesen. Im Vakuum ist der optimale Arbeitspunkt zu größeren Lagerspalten verschoben und es wird eine höhere Tragkraft bei geringerer Steifigkeit erzielt. Neben der reduzierten Steifigkeit ist vor allem der größere Lager-

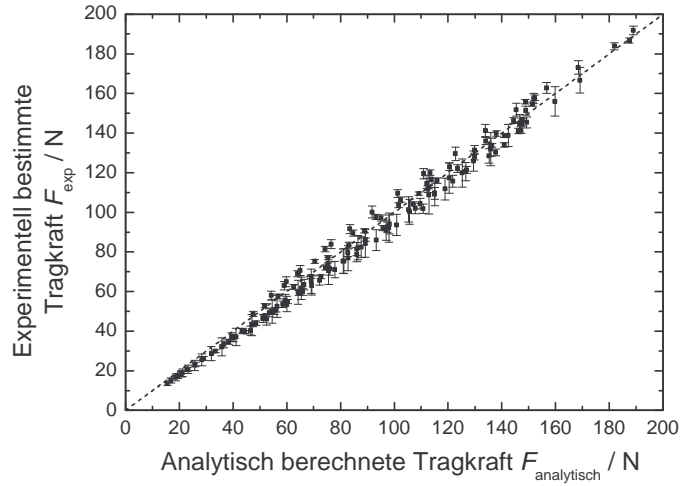


Abbildung 4: Gegenüberstellung gemessener und berechneter Tragkräfte.

spalt des optimalen Arbeitspunktes ein für die Vakuumanwendung kritisch zu bewertender Parameter, da dieser den Leckstrom in die Vakuumumgebung maßgeblich beeinflusst.

Zur Optimierung der Lagereigenschaften und Minimierung des Leckstromes in die Vakuumumgebung wurden vergleichende Untersuchungen an Lagerelementen mit einem reduzierten Düsendurchmesser durchgeführt. Abbildung 5 zeigt für Lagerelemente mit Düsendurchmessern von $50\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ experimentell bestimmte und analytisch gewonnene statische Lagerparameter sowie die gemessenen Druckwerte der Vakuumkammer und der Absaugung für den optimalen Arbeitspunkt in Abhängigkeit vom Speisedruck.

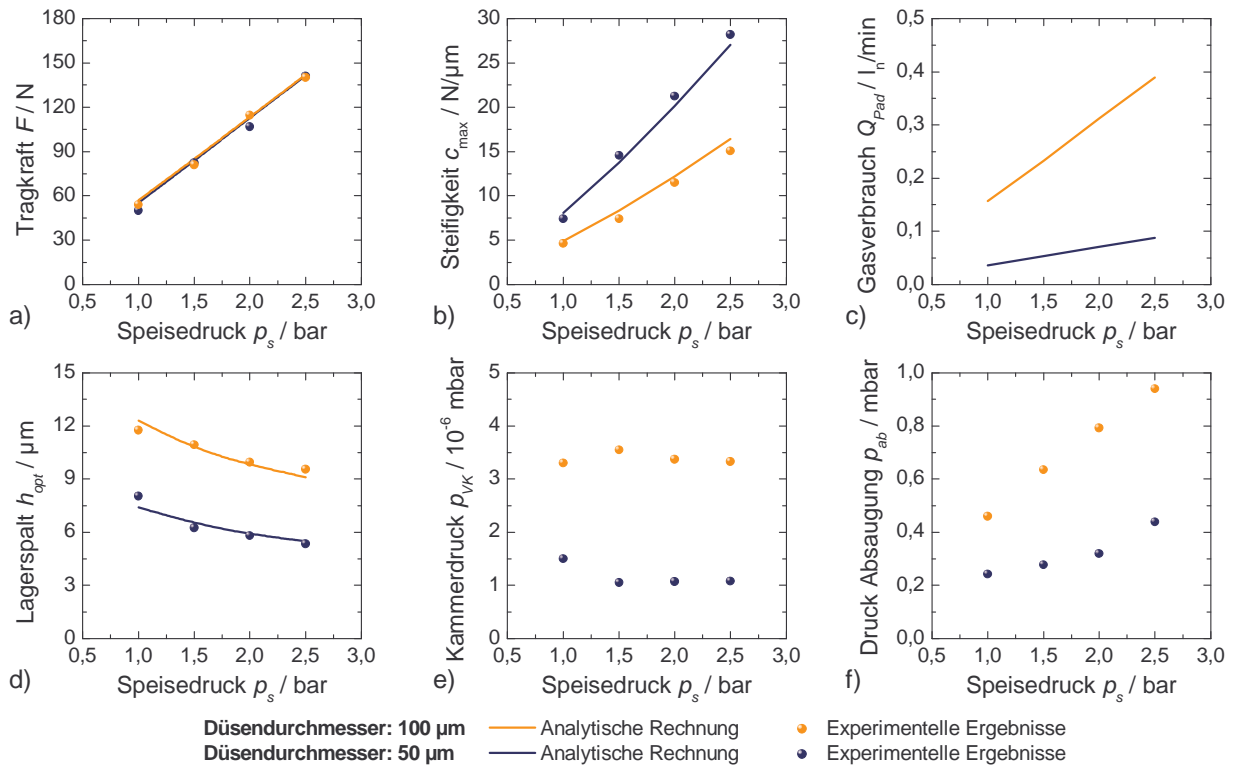


Abbildung 5: Analytisch und experimentell bestimmte Eigenschaften der Lagerelemente im optimalen Arbeitspunkt (Arbeitsgas: Stickstoff).

Die Tragkraft im optimalen Arbeitspunkt zeigt in erster Näherung keine Abhängigkeit vom Düsendurchmesser und steigt linear mit dem Speisedruck (Abb. 5a). Die maximale Steifigkeit weist einen steilen, leicht progressiven Anstieg für zunehmenden Speisedruck auf (Abb. 5b). Für die Lagerelemente mit geringerem Düsendurchmesser wird eine signifikant höhere maximale Steifigkeit bei kleineren Lagerspalten erreicht. Die optimalen Lagerspalte zeigen mit zunehmendem Speisedruck einen leicht degressiven Abfall (Abb. 5d).

Der Gasverbrauch und der in der Absaugleitung gemessene Druck steigen mit größer werdendem Speisedruck an (Abb. 5c/f). Der Kammerdruck zeigt keine ausgeprägte Abhängigkeit vom Speisedruck und nimmt für den untersuchten Bereich nahezu konstante Werte an (Abb. 5e). Sowohl der berechnete Gasverbrauch als auch die gemessenen Druckwerte in der Absaugleitung und in der Vakuumkammer fallen für das Lagerelement mit reduziertem Düsendurchmesser deutlich niedriger aus.

DISKUSSION

Zur Quantifizierung der in Abbildung 5 ermittelten Abhängigkeiten der Lagereigenschaften wird zunächst die Annahme getroffen, dass im gesamten Abströmspalt eine Kontinuumsströmung ausgeprägt ist. Diese Vereinfachung führt bei großen Speisedrücken und Lagerspalten für Gase mit großem gaskinetischen Wirkungsdurchmesser zu einer guten Näherung, da hier die von der mittleren freien Weglänge abhängigen Terme der Berechnungsgleichungen vernachlässigt werden können, vergleiche Abbildung 1.

Die Tragkraft ist mit dem konstanten Flächenbeiwert aus (12) nach (9) direkt proportional zum Kammerdruck. Für eine beliebige Tragkraft respektive einen beliebigen Kammerdruck folgt bei einer Modifikation des Drosselquerschnittes aus (7) und (14) eine äquivalente Änderung des Gasverbrauches. Gleichzeitig verschiebt sich der Betrag des Lagerspaltes nach (6) um einen Faktor, der sich aus der dritten Wurzel des Verhältnisses der Drosselquerschnitte ergibt. Die Tragkraftkurve wird in Richtung des Lagerspaltes gestaucht oder gestreckt. Nach (6) und (7) wird die maximale Steifigkeit unabhängig vom Speisedruck bei einem bestimmten Verhältnis p_k/p_s erreicht. Im optimalen Arbeitspunkt sind damit die Tragkraft unabhängig vom Düsendurchmesser sowie Massestrom und Tragkraft direkt proportional zum Speisedruck.

Durch eine Normierung der Tragkraft, des Lagerspaltes sowie des auf den Drosselquerschnitt und Speisedruck bezogenen Gasverbrauches auf die entsprechenden Werte im optimalen Arbeitspunkt ergeben sich aufgrund der aufgeführten Abhängigkeiten dimensionslose Kennlinien als Funktion des normierten Lagerspaltes, die die Lagereigenschaften unabhängig vom Speisedruck und Drosselquerschnitt für ein Radienverhältnis R_d/r_0 charakterisieren.

Für die untersuchten Lagerelemente folgt aus der Halbierung des Düsendurchmessers von $100\text{ }\mu\text{m}$ auf $50\text{ }\mu\text{m}$ ein um den Faktor vier reduzierter Gasverbrauch. Die maximale Steifigkeit wird bei einem um den Faktor $\sqrt[3]{4}$ kleineren Lagerspalt bei gleicher Tragkraft erreicht und weist nach (13) einen um den selben Faktor höheren Betrag auf.

Aus einer Verdopplung des Speisedruckes folgt für den optimalen Arbeitspunkt eine Verdopplung der Tragkraft und des Gasverbrauches, eine Verringerung des Lagerspalt um den Faktor $\sqrt[3]{1/2}$ sowie eine Erhöhung der maximalen Steifigkeit um den Faktor $2/\sqrt[3]{1/2}$.

Aufgrund des zusätzlichen Terms in (6) und (11) zur Berücksichtigung der sich in Bereichen des Abströmspalt einstellenden Knudsenströmung gelten die aufgeführten quantitativen Zusammenhänge nur näherungsweise, so dass die Lagereigenschaften mit diesen Werten nur abgeschätzt werden können. Der Vorteil gegenüber dem vollständigen, numerisch zu lösenden Gleichungssystem liegt in dem deutlich reduzierten Rechenaufwand. Die unter Berücksichtigung der Knudsenströmung berechneten Graphen in Abbildung 5 zeigen grundsätzlich ähnliche qualitative Abhängigkeiten und werden durch die Experimente sehr gut bestätigt.

Der in der Absaugleitung gemessene Druck steigt aufgrund der Abpumpcharakteristik der eingesetzten Drehschieberpumpe mit dem Gasverbrauch an. Eine Verschiebung des optimalen Arbeitspunktes zu kleineren Lagerspalten führt zu einer verminderten Durchtrittswahrscheinlichkeit des Arbeitsgases durch den Dichtspalt. Die Druckerhöhung in der Absaugung und die Reduktion des Dichtspaltes mit zunehmendem Speisedruck beeinflussen den Leckstromes in die Vakuumumgebung gegenläufig, so dass der Kammerdruck über den untersuchten Speisedruckbereich nahezu konstant bleibt.

Aus dem niedrigeren Gasverbrauch der Lagerelemente mit einem Düsendurchmesser von $50\text{ }\mu\text{m}$ folgt in Verbindung mit dem geringeren Lagerspalt im optimalen Arbeitspunkt ein signifikant niedrigerer Leckstrom in die Vakuumumgebung. Gleichzeitig werden höhere Steifigkeiten erzielt. Für Anwendungen im Vakuum ist folglich der Einsatz von Lagerelementen mit einem geringen Düsendurchmesser anzustreben.

ZUSAMMENFASSUNG

Für die Anwendung ebener aerostatischer Düsenlagerelemente mit Mikroverteilerstrukturen im Hochvakuum wurde ein analytisches Modell zur Dimensionierung vorgestellt. Im Unterschied zu bestehenden Modellen wurde die sich im Lagerspalt aufgrund des Druckabfalls bis in den Bereich des Grobvakuums ausbildende Knudsenströmung in den Berechnungsgleichungen berücksichtigt. Anhand experimenteller Untersuchungen in einer Hochvakuumumgebung bis

10^{-7} mbar wurde das aufgestellte Modell verifiziert. Die experimentell ermittelten Lagereigenschaften zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit analytisch berechneten Werten.

Mittels vergleichender Experimente an Lagerelementen mit verschiedenen Drosselquerschnitten konnte ein signifikanter Einfluss des Düsendurchmessers auf die Vakuumtauglichkeit der Lagerelemente nachgewiesen werden. Eine Reduktion des Drosselquerschnittes führt neben der Erhöhung der maximalen Steifigkeit im optimalen Arbeitspunkt zu einem geringeren Gasverbrauch und Leckstrom in die Vakuumumgebung.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] A. Wiemer, Luftlagerungen. VEB Verlag Technik Berlin (1969)
- [2] H. Donat, Ein Beitrag zur Dimensionierung und Konstruktion ebener luftgeschmierter Führungen unter besonderer Berücksichtigung ihres Einsatzes in Mehrkoordinatenmessmaschinen. Dissertation TH Ilmenau (1985)
- [3] J. Dormann, Strömungssimulation von Luftlagern mit diskreter Düsenverteilung. VDI Verlag Düsseldorf (2002)
- [4] M. Gerke, Auslegung von ebenen und zylindrischen aerostatischen Lagern bei stationärem Betrieb. Dissertation TU München (1991)
- [5] R. Unterberger, Vereinfachte Berechnung der Tragfähigkeit von aerostatischen Luft-Lagern und Führungen. Feinwerktechnik & Messtechnik 87/8, p.372-380 (1979)
- [6] C. Schenk, S. Risse, Investigation on gas bearings operable in high vacuum environment for engineering at nanoscale. Proceedings of 5th euspen, p.121-124 (2005)
- [7] D. Rist, Dynamik realer Gase: Grundlagen, Berechnungen und Daten für Thermogasdynamik, Strömungsmechanik und Gastech. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1996)
- [8] J.H. Spurk, Strömungslehre – Einführung in die Theorie der Strömungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1996)

Autorenangabe(n):

Christoph Schenk
Dr. Stefan Risse
Fraunhofer IOF, Albert-Einstein-Straße 7
07745, Jena
Tel.: 03641-807 304
Fax: 03641-807 604
E-mail: schenk@iof.fhg.de